

Docket No.: 61352-056

**PATENT**

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

In re Application of : Customer Number: 20277  
Nobuyuki OTSUKA, et al. : Confirmation Number:  
Serial No.: : Group Art Unit:  
Filed: November 24, 2003 : Examiner:  
For: SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING DEVICE AND METHOD OF FABRICATING  
THE SAME

**CLAIM OF PRIORITY AND  
TRANSMITTAL OF CERTIFIED PRIORITY DOCUMENT**

Mail Stop Patent Application  
Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

In accordance with the provisions of 35 U.S.C. 119, Applicants hereby claim the priority of:  
**Japanese Patent Application No. 2002-032073, filed February 8, 2002**

A Certified copy is submitted herewith.

Respectfully submitted,

MCDERMOTT, WILL & EMERY

  
Michael E. Fogarty  
Registration No. 36,139

600 13<sup>th</sup> Street, N.W.  
Washington, DC 20005-3096  
(202) 756-8000 MEF:prg  
Facsimile: (202) 756-8087  
**Date: November 24, 2003**

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

61352-056  
N. OTSUKA et al.  
NOV. 24, 2003  
McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日  
Date of Application:

2002年 2月 8日

出 願 番 号  
Application Number:

特願2002-032073

[ ST.10/C ]:

[ JP 2002-032073 ]

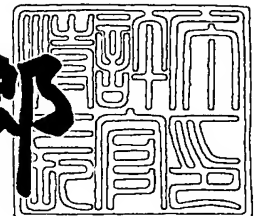
出 願 人  
Applicant(s):

松下電器産業株式会社

2003年 3月 7日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3014139

【書類名】 特許願

【整理番号】 2030240007

【提出日】 平成14年 2月 8日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01S 3/18

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内

【氏名】 大塚 信之

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内

【氏名】 吉井 重雄

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 松下電器産業株式会社内

【氏名】 横川 俊哉

【特許出願人】

【識別番号】 000005821

【氏名又は名称】 松下電器産業株式会社

【代理人】

【識別番号】 100097445

【弁理士】

【氏名又は名称】 岩橋 文雄

【選任した代理人】

【識別番号】 100103355

【弁理士】

【氏名又は名称】 坂口 智康

【選任した代理人】

【識別番号】 100109667

【弁理士】

【氏名又は名称】 内藤 浩樹

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011305

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9809938

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体発光素子およびその製造方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなる発光素子において、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造を有することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 2】 周期的結晶構造領域から基板表面に垂直な光出力を得ることを特徴とする請求項 1 記載の半導体発光素子。

【請求項 3】 周期的結晶構造領域が、半導体結晶と空気で構成されていることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の半導体発光素子。

【請求項 4】 周期的結晶構造領域が、2 次元的な周期構造を有しており、正格子あるいは三角格子よりなることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 5】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、周期的結晶構造領域が、共振器端面近傍に存在することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 6】 周期的結晶構造領域が、共振器全面に形成されていることを特徴とする請求項 5 記載の半導体発光素子。

【請求項 7】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、周期的結晶構造領域は円筒形あるいは矩形の凹部より構成されることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 8】 周期的結晶構造領域は円筒形の凹部と矩形の凹部より構成され、光出力領域は円筒形の凹部よりなることを特徴とする請求項 7 記載の半導体発光素子。

【請求項 9】 電極が光出力領域を除いた周期的結晶構造領域上に形成されて

いることを特徴とする請求項 1 から 8 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 1 0】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、周期的結晶構造領域は共振器中央部に形成されていることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 1】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、周期的結晶構造領域の構造体の周期は共振器方向と共振器と垂直方向で異なることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 2】 周期的結晶構造領域の構造体の周期は、共振器と垂直方向に比べて共振器方向の方が長いことを特徴とする請求項 1 1 記載の半導体発光素子。

【請求項 1 3】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、周期的結晶構造領域に、共振器方向に波長／実行屈折率分長い周期を有する部位を含むことを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 4】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、共振器端面が誘電体による高反射膜で構成されていることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 5】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、共振器周辺にフォトリックバンドギャップ結晶構造を有することを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 6】 半導体基板と、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を含む多層結晶構造よりなり、前記多層結晶構造に周期的結晶構造を有し、前記多層結晶構造が前記基板表面に平行な方向の共振器構造において、基板表面平面状

において、複数の共振器が交差していることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 1 7】 共振器の幅が  $10\ \mu\text{m}$  以下であることを特徴とする請求項 1 から 1 6 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 1 8】 周期的結晶構造領域の幅が  $10\ \mu\text{m}$  以下であることを特徴とする請求項 1 から 1 6 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 1 9】 周期的結晶構造領域の幅が  $2\ \mu\text{m}$  以上であることを特徴とする請求項 1 から 1 7 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 2 0】 共振器長が  $50\ \mu\text{m}$  以下であることを特徴とする請求項 1 から 1 9 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 2 1】 周期的結晶構造領域は凸部より構成されることを特徴とする請求項 1 から 2 0 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【請求項 2 2】 半導体基板上に、下部クラッド層、活性層、上部クラッド層を MOVPE 成長する第 1 のエピタキシャル成長工程と、絶縁膜をマスクとして前記上部クラッド層を円筒状にエッチングを行う第 1 のエッチング工程と、絶縁膜をマスクとして前記上部クラッド層から下部クラッド層までをエッチングする第 2 のエッチング工程と、上部電極と下部電極を蒸着する電極形成工程を含むことを特徴とする半導体発光素子の製造方法。

【請求項 2 3】 エッチングはハロゲンガスあるいは、水素化ハロゲンガスを用いて成形した後、炭素系ガスを用いてダメージ領域を除去するドライエッチングにより行うことを特徴とする請求項 2 2 記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項 2 4】 絶縁膜をマスクとして上部クラッド層上に結晶を選択成長する第 2 のエピタキシャル成長工程と、絶縁膜をマスクとして前記上部クラッド層から下部クラッド層までをエッチングする第 1 のエッチング工程と、上部電極と下部電極を蒸着する電極形成工程を含むことを特徴とする半導体発光素子の製造方法。

【請求項 2 5】 上部電極は膜厚が  $50\ \text{nm}$  以下の Cr および Pt 電極を蒸着した後、Pt/Au 薄膜を圧接することで形成することを特徴とする請求項 2 2 から 2 4 のいずれかに記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項 2 6】 発光波長を共振器方向のフォトニック結晶の高エネルギーバ

ンド端と一致させることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 2 7】 発光波長を共振器に垂直方向のフォトニック結晶のバンドギャップ内とすることを特徴とする請求項 2 6 記載の半導体発光素子。

【請求項 2 8】 交差共振器構造の周期的結晶構造領域において、共振器領域の非縮退バンドの高エネルギー側と交差領域の高エネルギーバンド端を一致させることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項 2 9】 電場の偏光が  $90^\circ$  の位相で直行していることを特徴とする請求項 2 8 記載の半導体発光素子。

【発明の詳細な説明】

【0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、基板上に成長したフォトニック結晶を用いた垂直出射型の面型発光素子およびその製造方法に関する。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

従来のフォトニック結晶を用いた半導体発光素子の構造として、「今田他：アプライドフィジックスレターズ 7 5 ( 1 9 9 9 ) 3 1 6 ( A p p l . P h y s . L e t t . 7 5 ( 1 9 9 9 ) 3 1 6 )」に記載されたものがある。図 1 は、従来のフォトニック結晶を用いた半導体発光素子を示す図であり、1 は n 型 In P 基板、2 は n 型 In P フォトニック結晶層、3 は n 型 In P 下部クラッド層、4 は In Ga A s P よりなる量子井戸活性層、5 は p 型 In P 上部クラッド層、6 は直径が  $350\text{ }\mu\text{m}$  の上部電極 (= p 側電極)、7 は下部電極 (= n 側電極)、8 は表面からの発光領域、9 はフォトニック結晶層 2 に形成された直径が  $0.2\text{ }\mu\text{m}$  程度の凹部である。フォトニック結晶 2 と、上部クラッド層 5 から下部クラッド層 3 までとは、各々異なる基板上に成長しておき、下部クラッド層 3 とフォトニック結晶層 2 の表面を接触させ、水素雰囲気中でアニールすることにより、融着 1 0 させる。その後、上部クラッド層 5 を成長した基板を除去して図 1 に示した構造を得た。上部電極 6 と下部電極 7 との間に電流を流すことにより、閾値電流 2 A 以上で誘導放出を確認し、発振波長は  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  の単一モードが



得られた。発光は上部電極外周部より得られた。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

従来例では、閾値電流が2 Aと大きい。これは、上部電極6の面積が大きいためである。また、上部電極6が円形の電極であるために、偏波面がいろいろな方向を持つという問題があった。なお、凹部9の形状を楕円形にすることで偏波面を揃えようとすることも考えられるが、形状のそろった楕円形状を形成するのは困難であるという問題があった。さらに、同一の偏波面を有する光でも2つの安定する発光モードが存在することにより、発光波長が不安定になる問題があった。一方、素子製造方法として、結晶の融着を用いているが、大口径基板全面での融着は困難であるという問題があった。

【0004】

【課題を解決するための手段】

上述した閾値電流を低減する第1の手段として、図2に一例を示したように、上部電極面積を小さくする方法を考案した。

【0005】

また、閾値電流を低減する第2の手段として共振器長を50  $\mu\text{m}$ 以下とした。

【0006】

偏波面を一定にする第1の手段として、図2に一例を示したように、ストライプ幅を10  $\mu\text{m}$ 以下とした。

【0007】

また、偏波面を一定にする第2の手段としてストライプ方向をフォトリソ結晶の周期ポテンシャルの方向とした。

【0008】

発光波長を単一にする第1の手段として、図4に一例を示したように、端面コーティングした誘電体薄膜により端面反射率を大きくした。

【0009】

また発光波長を単一にする第2の手段として、図6に一例を示したように、フォトリソ結晶中央部に $\lambda/4$ シフト領域を形成した。

## 【 0 0 1 0 】

発光波長を単一にする第 3 の手段として、図 7 に一例を示したように、共振器長を  $20\ \mu\text{m}$  以下にした。

## 【 0 0 1 1 】

素子製造方法として、結晶の融着を用いているが、大口径基板全面での融着は困難であるため、選択成長やドライエッチングを用いることで、素子の作製を容易にした。

## 【 0 0 1 2 】

## 【発明の実施の形態】

閾値電流を低減する第 1 の手段として、図 2 に一例を示したように、電極面積を小さくする方法を考案した。この例に係る発光素子は、活性層領域を発光領域とおなじ幅のストライプ状として、電流注入面積を  $2.5 \times 10^{-5}\ \text{cm}^{-2}$  以下とすることにより、発振閾値電流を  $20\ \text{mA}$  以下に低減できる。ここで、ストライプ外に放射する自然放出光を抑制するために、ストライプ方向には発光波長とバンド端を一致させ、ストライプ方向と直交する方向には発光波長がバンドギャップ内となるように、凹部の周期をストライプ方向と垂直方向で変化させている。

## 【 0 0 1 3 】

また、閾値電流を低減する第 2 の手段として共振器長を  $50\ \mu\text{m}$  以下とすることで、閾値電流密度がほぼ 0 でありながら、単一モードで発光する高速動作の発光ダイオードを可能とした。

## 【 0 0 1 4 】

偏波面を一定にする第 1 の手段として、図 2 に一例を示したように、ストライプ幅を  $10\ \mu\text{m}$  以下とした。その結果、磁場の方向がストライプ方向と垂直になることにより凹部 9 の形状が円形でも偏波面を一定に揃えることが可能となった。

## 【 0 0 1 5 】

また、偏波面を一定にする第 2 の手段としてストライプ方向をフォトニック結晶の周期ポテンシャルの方向とすることで、偏波面の同一の光の結合を可能とした。

【0016】

発光波長を単一にする第1の手段として、図4に一例を示したように、端面コーティングした誘電体薄膜11により端面反射率を大きくした。

【0017】

また発光波長を単一にする第2の手段として、図6に一例を示したように、フォトニック結晶中央部に $\lambda/4$ シフト領域14を形成した。この領域は光強度が最も強くなるために、光の取りだし領域とした。その結果、キャビティ内の進行波と後退波が異なるようになり、一方の波長の利得が大きくなることで単一モード発光を可能とした。

【0018】

発光波長を単一にする第3の手段として、図7に一例を示したように、共振器長を $20\mu\text{m}$ 以下にした。その結果、縦モードの間隔は $27\text{nm}$ となり、サイドモードが離れることにより単一モード発光が可能となった。このように、自然放出光をフォトニック結晶と強く結合させることにより、凹部の周期と一致した単一の縦モードで発光する発光ダイオードを実現することができる。

【0019】

素子製造方法として、結晶の融着を用いているが、大口径基板全面での融着は困難であるため、選択成長やドライエッチングを用いることで、素子の作製を容易にした。

【0020】

以下、本発明の実施の形態について説明する。

【0021】

(実施の形態1)

本発明の半導体発光素子の第一の実施の形態として、図2に、閾値電流を低減する第1の手段として電流注入領域をストライプ形状とすることで電極面積を小さくしたフォトニック結晶発光素子構造を示す。まず、図2(a)に基本となる構造を示す。

【0022】

以下、この素子の製造方法と構造と動作方法について説明する。発光波長は1

3  $\mu\text{m}$ とした。まず、素子の製造方法を示す。図9 (a) に示したように、n型InP基板1上に、Siをドーピングしたn型InP下部クラッド層2 (100 nm厚)、InGaAsP/InGaAsP量子井戸活性層4、Znをドーピングしたp型InP上部クラッド層5 (50 nm厚)をMOVPE法等によりエピタキシャル成長した。量子井戸活性層4は、それぞれアンドープで5ペアの $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.2}\text{P}_{0.8}$ バリア層 (10 nm厚、組成波長1.1  $\mu\text{m}$ 、格子歪0%)と $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ 井戸層 (4 nm厚、量子井戸波長1.3  $\mu\text{m}$ 、格子歪1%)および導波路 (ガイド) 層からなる歪量子井戸構造である。不純物を意図的に添加せず、アンドープとしたのは、荷電子帯吸収や自由電子吸収を抑制するためである。その後、図9 (b) に示したように $\text{SiO}_2$ 膜をエッチングマスクとして、円形状に $\text{Cl}_2$ ガスと $\text{CH}_4$ ガスを用いてICPドライエッチングしてフォトニック結晶構造2を有する凹部9を形成する。エッチング深さは、フォトニック結晶領域が2  $\mu\text{m}$ 以上ある場合には、図2 (a) に示したように、活性層をエッチングしないように上部クラッド層中でエッチングを停止する。それにより、活性層に及ぼすダメージを抑制して、発光効率を上げることができる。一方、フォトニック結晶領域が10  $\mu\text{m}$ 以下の場合には、図2 (c) に示したように、活性層を通り越して下部クラッド層までエッチングする。フォトニック結晶領域が10  $\mu\text{m}$ 以下と短い場合には、フォトニック結晶による効果が小さくなってしまう。光がフォトニック結晶とカップリングしやすくするために、光の分布の大部分がフォトニック結晶による回折を受けるようにしている。この場合、ドライエッチングによるダメージが心配されるが、 $\text{Cl}_2$ ガスでエッチングした後に、ダメージ領域を $\text{CH}_4$ や $\text{SF}_6$ ガスでエッチングすることにより、閾値電流の増大を抑制している。その後、図9 (c) に示したように、磷酸系エッチャントで上部クラッド層5をストライプ領域となるように基板までエッチング除去し、図9 (d) に示したように、上部電極としてCr/Pt/Au電極を、下部電極としてAu-Sn電極を蒸着し、フォトニック結晶以外の上部クラッド層上に上部電極が形成されるように上部電極をリフトオフにより成形し図2に示した構造を得た。ストライプ幅は、2~10  $\mu\text{m}$ とした。ストライプ幅が2  $\mu\text{m}$ 程度と狭いほど、外部微分量子効率が上昇するが、注入電流を増加するにしたが

って出力光強度が飽和してくる。一方、ストライプ幅を  $10\ \mu\text{m}$  程度まで広げると、フォトリック結晶領域では横方向にも光を閉じ込めることができるので出力飽和は抑制できるが、フォトリック結晶のない領域での光のモードが不安定になる。従って、フォトリック結晶領域の結合係数が小さい場合には、ストライプ幅の増大には限界がある。ストライプ方向はへきかい性に優れた  $\langle 110 \rangle$  あるいは  $\langle -110 \rangle$  方向としたが、ドライエッチングにより共振器を形成する場合には、特に共振器方向に限定はない。ただし、エッチング端面の垂直性を良くしようとした場合には、 $\langle 110 \rangle$  あるいは  $\langle -110 \rangle$  方向のほうが優れていた。ストライプの長さは、 $20\ \mu\text{m}$  から  $50\ \mu\text{m}$  とした。これは、フォトリック結晶で回折されて取り出される光強度が小さいために、端面コートなどによりストライプの端面損失を低下させることで光損失が通常のレーザより極めて小さくなり、短共振器にして利得が低下しても十分外部に光を取り出すことが可能となるためである。その結果、ストライプ長を  $50\ \mu\text{m}$  にした場合には閾値電流が  $20\ \mu\text{A}$  程度となり、ストライプ長を  $20\ \mu\text{m}$  とした場合には、閾値となる電流値は存在せず、光出力が注入電流に正比例して増加することが明らかとなった。

#### 【 0 0 2 3 】

図 2 および図 9 においては、フォトリック結晶構造として円筒状の凹形状を形成したが、円筒状の凸形状でも構わない。今回円筒状の凹形状を選択したのは、凹形状のほうがドライエッチングする面積が小さいためにダメージが抑制されるためである。さらに、凸形状にした場合には、凸部が孤立しているために強度的に問題があると考えた。一方、凸形状にすると透過屈折率が小さくなるため、凹形状に比べて周期を大きくすることができるというメリットがある。 $0.85\ \mu\text{m}$  などと、光の波長が短くなる場合には凸形状のほうが望ましい。以上の点は、全実施例において同様である。

#### 【 0 0 2 4 】

以下、この素子の動作方法について図 2 (d) と図 2 (e) を用いて説明する。フォトリック結晶の形成されていない領域では図 2 (d) に示したように、波数が大きくなるにしたがってエネルギーが直線的に上昇する。図 2 (d) では、光のエネルギーが小さい領域のエネルギーと波数の関係において、周期性により

おり返された後の関係を示しているため、波数が減少するにしたがってエネルギーが上昇し、その後再びおり返されて、波数が大きくなるにしたがってエネルギーが上昇する。その結果、フォトニック結晶による摂動が形成されていないので波数とエネルギーは連続に変化しており、フォトニックバンドギャップは形成されない。また、自然放出光は、図中に自然放出光の光強度を横軸にエネルギーとして波長を縦軸に示したように、ローレンツ分布を示す。一方、フォトニック結晶の領域では、フォトニック結晶による摂動で、図 2 (e) に示したようにフォトニックバンドギャップ (PBG) が形成される。このフォトニックバンドギャップ内では自然放出光は存在することができない。一方、フォトニックバンドギャップの高エネルギー端以上と低エネルギー端以下の部分には自然放出光が存在することが可能となる。フォトニックバンドギャップの中心エネルギーに対応する光の角速度  $\omega_0$  は、フォトニック結晶の周期  $\Lambda$  から  $n_{eff} \cdot \omega_0 / c = \pi / \Lambda$  の関係を示す。ここで、 $n_{eff}$  は光の感じる等価屈折率、 $c$  は光速である。フォトニックギャップの大きさ  $\Delta\omega$  は、 $\Delta\omega = 2\kappa c / n_{eff}$  となる。ここで、 $\kappa$  は結合係数である。ここで、フォトニックバンドギャップの高エネルギー端と自然放出光のエネルギーが一致した場合には、自然放出光を発生する電子と光の関係に加えてフォトニック結晶の摂動による関係が付加されて、電子と光の遷移確率も摂動を受ける。その結果、図 2 (e) に示したように、自然放出光とフォトニックバンドギャップがカップリングして超放射による強い自然放出光強度が得られる。この場合の自然放出光の半値幅は 0.2 nm 以下であり、発光強度は約 30 倍程度となる。ここで、図 2 (e) では、フォトニックバンドギャップの高エネルギー端と自然放出光波長を一致させたが、フォトニックバンドギャップの低エネルギー端でも同様の効果が得られる。ただし、正方格子の場合には、高エネルギー端の方がバンド間隔が大きく離れているために縮退の影響が無いので、高エネルギー端を選択した。

#### 【0025】

本実施例のフォトニック結晶発光素子特性を求めた結果、特に閾値となる電流値は存在せず、光出力が注入電流に応じて増加した。波長が 1.3  $\mu\text{m}$  において、外部微分量子効率、60%程度となった。動作速度は、注入電流が 2 mA 以

上において 1 0 G H z が得られた。発光領域から同一周波数で位相の揃ったコヒーレント光が得られるため、レンズの N A に対応する値までスポットを絞りこむことができる。また、T E 光の偏波面はストライプ方向となっており、出射光の方向は基板面に垂直となる。パルス状に強い電流を注入することにより、ピコ秒の強い発光が生ずる超放射現象も得られる。

## 【 0 0 2 6 】

基板は I n P 結晶としたが、フォトリソグラフィ結晶の作製精度が上がれば、G a A s や G a N や G a P 結晶も使用することができる。また、基板を n 型としたが、p 型であっても良い。n 型結晶のほうが一般的には抵抗値が低いため、活性層までの間にフォトリソグラフィ結晶がある方を n 型にするほうが、電流が均一に活性層に注入されるため好ましい。フォトリソグラフィ結晶領域のストライプ方向の幅は、図 2 ( a ) の場合には  $2 \mu\text{m}$  以上、図 2 ( c ) の場合には  $10 \mu\text{m}$  以下とした。その結果、フォトリソグラフィ結晶の幅が  $2 \mu\text{m}$  以上  $10 \mu\text{m}$  以下の場合には図 2 ( a ) と図 2 ( c ) のいずれの場合でもよいことになる。この領域においてどちらの構造が良いかはドライエッチングダメージの大きさとエッチング表面形状の平坦性に左右される。ドライエッチング時に、 $\text{Cl}_2$  ガスで平坦性のよい表面を形成し、 $\text{CF}_4$  ガスでダメージ領域を除去することで、より広いフォトリソグラフィ結晶幅において図 2 ( c ) 構造が可能となる。フォトリソグラフィ結晶の凹部は円形状としたが、矩形状でも可能である。ただし、形状の揃った矩形を作成することが困難であったため円形状とした。これは、楕円形状においても同様で、楕円率が大きくなるほど形状のばらつきが大きくなる問題があったため、真円形状とした。以降の実施の形態においても同様である。

## 【 0 0 2 7 】

## (実施の形態 2)

本発明の半導体発光素子の第二の実施の形態として、図 3 に、閾値電流を低減する第 2 の手段としてストライプ方向 9 - 1 と、ストライプに垂直方向 9 - 2 のフォトリソグラフィ結晶の周期を変えることで横方向への自然放出光の漏洩を防止したフォトリソグラフィ結晶発光素子構造を示す。また、実施の形態 1 では、ドライエッチングを用いたフォトリソグラフィ結晶発光素子の作製方法を示したが、本実施の形態で

は、選択成長法を用いた製造方法を図10を用いて示す。もちろん、図9に示したドライエッチングを用いた方法でも同様に作製できており、ここに示す全実施の形態においてドライエッチングでも選択成長でもフォトリソグラフィは作製できている。

#### 【0028】

まず、素子の製造方法を示す。図10(a)に示したように、n型InP基板1上に、Siをドーピングしたn型InP下部クラッド層2(100nm厚)、InGaAsP/InGaAsP量子井戸活性層4、Znをドーピングしたp型InP上部クラッド層5(10nm厚)をMOVPE法等によりエピタキシャル成長した。その後、図10(b)に示したようにSiO<sub>2</sub>膜を選択成長マスクとして、p型InP上部クラッド層5(100nm厚)を選択成長してフォトリソグラフィ結晶構造2を有する凹部9を形成する。この場合、選択成長時のファセットが形成が心配されるが、膜厚が200nmの場合には特に問題とならなかった。その後、図10(c)に示したように、リン酸系エッチャントで上部クラッド層5をストライプ領域となるように基板までエッチング除去し、図10(d)に示したように、上部電極としてCr/Pt/Au電極を、下部電極としてAu-Sn電極を蒸着し、フォトリソグラフィ結晶以外の上部クラッド層上に上部電極が形成されるように上部電極をリフトオフにより成形し図3(a)に示した構造を得た。

#### 【0029】

一方、図2(a)の構造では、図10(a)の工程で上部クラッド層まで成長しているが、図2(c)の構造を得るためには図10(a)の第1の結晶成長工程では下部クラッド層までを成長しておき、図10(b)の選択成長工程において下部クラッド層3、活性層4、上部クラッド層5を成長する必要がある。この場合、選択成長マスク近傍ではファセットが形成されるため各層の膜厚が薄くなり耐圧が低下してリーク電流が生ずるという問題があった。そこで、膜厚が薄い領域をエッチング除去するために、図10(b)の選択成長工程が終了後CH<sub>4</sub>やSF<sub>6</sub>ガスでエッチングすることにより、閾値電流の増大を抑制している。その後は、図10(c)、図10(d)に示したのと同じ工程を経て、図2(c)の構造を得る。



## 【 0 0 3 0 】

図 2 および図 1 0 においては、フォトニック結晶構造として円筒状の凹部を形成したが、円筒状の凸形状でも構わない。ただ、凸形状の場合には、孤立した円筒状の選択成長となることから、各凸部の成長が独立に進行する。その結果、凸部の高さがそれぞれ異なること態が容易に生ずるために、選択成長時の安定性確保という観点から問題があった。また、成長速度が大きい場合には凸部の先端にファセットが形成され、平坦にならないという問題もあった。そこで、選択成長条件を注意深く選択し、例えば成長温度の低下などといった成長条件の最適化により円筒状の凸部を有するフォトニック結晶構造を作製する必要があった。これは、全実施例において同様である。

## 【 0 0 3 1 】

以下、この素子構造と動作方法について説明する。出射光の波長は  $1.3 \mu\text{m}$  とした。図 3 (a) に示したように、選択成長で凹部を形成したフォトニック結晶の表面図を示す。ここで、エッチングによる凹部 9 のピッチは、ストライプの方向 9-1 よりストライプと垂直方向 9-2 の方が短くなっている。このフォトニック結晶のエネルギーと波数の関係を図 3 (b) と 3 (c) に示す。ストライプ方向では、フォトニック結晶のピッチ  $\Lambda$  を自然放出光の波長とフォトニックバンドギャップの高エネルギー端が一致するように設定している。一方、ストライプの垂直方向にはフォトニック結晶のピッチ  $\Lambda$  を小さくしてある。その結果、 $n_{\text{eff}} \cdot \omega / c = \pi / \Lambda$  から、バンドギャップの中心エネルギー ( $\omega$  と等価) は増加することになる。そして、横方向のエネルギーと波数の関係は図 3 (c) のようになる。ストライプ方向では自然放出光とバンド端がカップリング (結合) したが、ストライプに垂直方向では、自然放出光波長はバンドギャップ内部に位置することになり、ストライプに垂直方向には伝播しないことになる。その結果、ストライプ外部への光の染み出しが減少して、垂直と水平方向の間隔が等しい場合に対して低閾値電流での発振が実現できることがわかった。

## 【 0 0 3 2 】

さらに、本実施例においては、真円形状の凹部を用いても偏波面の制御が可能となる。実施の形態 1 においてストライプ形状にすることでストライプ方向に T

Eモードが形成されることを示したが、ストライプの幅が大きくなるとモード安定性が低下してしまう問題があった。本実施例に示したように、フォトリソ結晶のピッチを変えてストライプに垂直方向ではフォトリソバンドギャップを形成することにより、9-2方向でTEモードが存在できなくなり、ストライプの大きい場合にでも安定してストライプ方向にTEモードを誘起することが可能となった。

## 【0033】

ところで、本実施の形態においても真円形状としたが、選択成長の場合には、成長時にファセットが形成されるために矩形の領域を再現性良く作製することが可能となる。なかでも凸部の選択成長の場合には、ファセット成長を行うことで均一性に優れた凸部を作製することができた。従って、成長条件を最適化することにより凸部を選択成長で作製する場合には矩形の形状のフォトリソ結晶構造を取ることが可能であった。

## 【0034】

## (実施の形態3)

本発明の半導体発光素子の第三の実施の形態として、図4に閾値電流を低減する第3の手段としてストライプ端面に光の反射機能を持たせることで、ストライプ方向への自然放出光や誘導放出光の漏洩を防止したフォトリソ結晶発光素子構造を示す。まず、素子の製造方法を示す。図2(a)に示したフォトリソ発光素子構造を作製した後、共振器を形成するために図4(a)および図4(b)に示したように端面をドライエッチングで垂直面を形成した後、端面部にアルミナとチタニアよりなる絶縁体多層薄膜11を積層する。その後、ドライエッチングした溝にそって素子を分離する。この場合、絶縁体多層薄膜を垂直面に堆積(デポ)するためにECRスパッタ法を用いて高反射多層膜を積層した。層数は4層として、98%の反射率を得た。この高反射膜の形成によりレーザ端面の反射損失を大きく低減することが可能となり、実施の形態1にも示したとおり50 $\mu$ mの短共振器において、閾値電流が20 $\mu$ A程度となることを明らかにした。

## 【0035】

ただ、図4(a)に示した構造においては、絶縁体薄膜を堆積したが、垂直壁

面にデポすることにより各デポ時において絶縁体薄膜の膜厚が不均一となり、反射損失が増大してしまうという問題があった。そこで、図 4 (c) および図 4 (d) に示すように絶縁体多層薄膜に代えてフォトニック結晶で反射鏡を構成した。絶縁体薄膜の場合には、ストライプと平行方向の光しか反射することのできないため、レーザ用の反射鏡としてはむいてはいるが、本発光素子のように自然放出光を制御する場合には、ストライプ方向からわずかに方向のずれた自然放出光は十分に反射できないという問題があった。しかしながら、図 4 (c) および図 4 (d) に示したように発光領域 17 の周辺を反射用凹部 12 で取り囲むことにより水平方向の自然放出光は発光領域に反射することができる。発光領域から反射鏡領域への電流のリークを抑制するために、分離溝 18 を形成し、発光領域の周囲を下部クラッド層までエッチング除去した。反射用凹部は、片側に 4 周期程度で 98% の反射率が得られ、図 4 (d) に示したような 2 周期でも 95% 程度の反射率が得られることがわかった。その結果、実施の形態 1 にも示したとおり 20  $\mu$ m の短共振器において、無閾値レーザ発振が可能であることを明らかにした。

#### 【 0 0 3 6 】

##### (実施の形態 4)

本発明の半導体発光素子の第四の実施の形態として、図 5 に発光モードを安定にする第 1 の手段としてフォトニック結晶構造をストライプ全面に形成して、反射端面における光の位相の揺らぎによるモード不安定性を抑制したフォトニック結晶発光素子構造を示す。まず、素子の製造方法を示す。図 9 (a) に示したフォトニック発光素子構造を作製した後、図 9 (b) のドライエッチング工程においてストライプ領域全面に凹部 9 を形成する。その後、図 9 (c) のストライプエッチング工程を経て、図 9 (d) の電極形成工程で一部のフォトニック結晶上面に電極を形成する。最後に、共振器を形成するために端面をドライエッチングで垂直面を形成した後、端面部にアルミナとアモルファスシリコンよりなる絶縁体多層薄膜を積層する。その後、ドライエッチングした溝にそって素子を分離して、図 5 (b) の構造を得る。電極形成工程においては、凹部内部への電極金属の回り込みを抑制するために、全ての電極材料を蒸着するのではなく、フォトニ

ック結晶上に薄くCr/Ptを堆積してコンタクト抵抗を低下させた後、Pt/Auよりなる金属箔を接着することで電極を形成した。図2(c)の構造を作成する場合には、電極材料の回り込みは特に深刻で、フォトニック結晶全面に薄くSiO<sub>2</sub>膜を堆積した後、CHF<sub>3</sub>を用いたICPドライエッチングでフォトニック結晶表面のSiO<sub>2</sub>膜のみエッチング除去した後、電極を蒸着することでリーク電流を低減した。

#### 【0037】

このように、ストライプ全面にフォトニック結晶を形成することにより、フォトニック結晶発光素子を高速で変調した場合においても共振器内に形成される光の定在波が安定する。これは、発光素子に変調電流を印加することにより共振器内部のキャリア密度の変動による屈折率変化でフォトニック結晶の存在していない領域で定在波が乱れるためである。本実施の形態において共振器全面にフォトニック結晶を形成してフォトニック結晶の周期に強制的に光の振動を同期させることにより40GHzの変調速度においても安定した発光モードが得られた。ただし、共振器長が100μm以上に大きくなった場合には、共振器内の光密度に共振器方向の分布が生じるために、動作速度が制限される問題が生じた。従って、本実施の形態は共振器長が100μm以下の場合において効果があると考えられる。

#### 【0038】

ところで、低閾値電流特性よりもモードの安定性が要求される場合には、図5(c)に示したように、フォトニック結晶構造の一部を円形凹部ではなくて、平板凹部とする。ここでは、モードの安定性の評価指標として偏波面の安定性まで含める。断面形状は図5(a)と同様である。円筒状正方格子の二次元フォトニック結晶の場合にはβ方向へも光が結合しているためにβ方向の光分布の変動により偏波面が回転してしまい、偏波面が不安定になってしまう。一方、平面凹部の場合、β方向への自然放出光の振動は生じず、ストライプ方向に進行する波動しか結合しないため、自然放出光を十分に利用することができず、閾値電流は上昇する。しかしながら、ストライプ断面方向で一様な位相で光が振動を受けるため偏波面の回転は生じないことが判った。その結果、閾値電流は0.1mA程度

であったが、光出力強度によらず一定の偏波面を有する出力光が得られることがわかった。

## 【 0 0 3 9 】

一方、光強度よりもモード安定性が要求される場合には、図 5 (d) や図 5 (e) に示したように、フォトニック結晶構造を共振器の端面近傍ではなくて中央部に設置する。図 5 (g) に示したように、強い光出力を得る場合には、共振器内の光強度が大きくなる反射端面近傍から光を取り出すほうが望ましい。しかしながら、端面近傍では、端面に近づくにつれ光強度が急激に増加するために、ホールバーニングが生じて偏波面が不安定になるという問題があった。図 5 (d) や図 5 (e) の構造にすることにより、フォトニック結晶が存在するのは光強度の弱い領域であるが、ホールバーニングが生じていないためモードが安定化する。図 5 (c) では偏波面を安定化するために平板凹部を導入したが、さらに偏波面の安定性を上げる方法として全面に平板凹部を形成した図 5 (f) の構造もある。この場合、偏波面は一定となるが、出力光が共振器内の光と十分に結合できないためと、自然放出光を有効に利用できないことから光出力は低下してしまうことが明らかとなった。

## 【 0 0 4 0 】

図 5 においては、フォトニック結晶構造として円筒状あるいは平板凹形状を形成したが、円筒状あるいは平板凸形状でも構わない。今回円筒状の凹形状を選択したのは、凹形状のほうがドライエッチングダメージが抑制されることと、フォトニック結晶上に電極を形成する場合に凹形状のほうが結晶の表面が連続しており、表面が平坦であることから電極を容易に形成できる利点があった。特に本実施の形態においては、下部クラッド層までエッチングしたり、活性層も選択成長した場合には凸部の周辺にも電極金属が蒸着されてショートする問題が深刻あった。

## 【 0 0 4 1 】

## (実施の形態 5)

本発明の半導体発光素子の第五の実施の形態として、図 6 に発光モードを安定にする第 2 の手段としてフォトニック結晶構造に位相シフト構造を導入して、フ

フォトニックバンドギャップの特定のエネルギーレベルで発光するフォトニック結晶発光素子構造を示す。図 6 (a) に示したように、フォトニック結晶構造の周期  $L$  を共振器中心部分において  $L + \lambda / 4 n$  に広げる。ここで、 $\lambda$  は光の波長、 $n$  は透過屈折率である。このようにストライプ方向の周期構造に対して冗長部分  $\lambda / 4 n$  を導入することにより左向きの波動と右向きの波動がカップリングして、共振器中央部分の光強度が増大する。その結果、フォトニック結晶の出射光領域の対称性がよいため、光ファイバとの接合が容易になる。また、共振器中央部分に位置することで強い光出力を得ることができる。

#### 【0042】

以下、この素子の動作方法について図 6 (c) と図 6 (d) を用いて説明する。結合する光のエネルギーは図 6 (c) に示したように周期の乱れである  $\lambda / 4 n$  シフトを起源とする格子欠陥が導入されたのと等価となり、フォトニックバンドギャップ内に欠陥順位に対応する光のエネルギーレベルが形成される。 $\lambda / 4 n$  シフト構造を導入した場合、格子欠陥に対応するエネルギーは  $n e f f \cdot \omega_0 / c = \pi / \Lambda$  から求められる値となる。従って、フォトニックバンドギャップエネルギーの中心のエネルギーに対応することになる。また、フォトニックバンドギャップのエネルギーは図 5 (d) に示した均一格子の  $\Delta \omega = 2 \kappa c / n e f f$  の 2 倍となる。均一格子の場合には図 3 (b) に示したように高エネルギー端と低エネルギー端で発光する可能性があったが、 $\lambda / 4 n$  シフト構造とすることにより最も発光しやすいフォトニックバンドギャップ中央で発光することになる。また、 $\lambda / 4 n$  シフト構造の場合は、欠陥の高エネルギー側も低エネルギー側もバンドギャップ内になっており、図 2 (e) に示した片側にフォトニックバンドギャップを有しない均一格子構造に対してより強く光は摂動を受けることになる。従って、大きな  $Q$  値を持ち、半値幅が小さく、大きな強度の自然放出光の特定モードの増幅が可能となる。

#### 【0043】

本実施の形態から自然放出光の波長と欠陥順位が一致した場合には、強い摂動による発光が実現されることがわかった。 $\alpha$  方向と  $\beta$  方向の周期を調整することで、横方向にはフォトニックバンドギャップ内に自然放出光レベルを存在させるこ

とができるようになる。その結果、横方向の光の伝播が不可能となって、ストライプ方向に単一モードの発光が観測されることになる。

#### 【0044】

このフォトリック結晶構造は、図6（a）に示した円形凹部であっても、図6（b）に示した平面凹部であってもよい。平面凹部を用いた場合には、閾値電流が大きく光出力強度が大きい、偏波面の安定性が高いことが特徴である。

#### 【0045】

##### （実施の形態6）

本発明の半導体発光素子の第六の実施の形態として、図7に発光モードを安定にする第3の手段として直交したフォトリック結晶構造を導入して、高エネルギー側のモードで発光するフォトリック結晶発光素子構造を示す。本実施例の場合には、自然放出光発生領域の面積が2倍となるために、光出力も倍増した。図7（a）に示したように、共振器の中央部に光出力領域を有した図5（d）に示したフォトリック発光素子構造を光出力領域を共有して直交させている。その結果、 $\alpha$ 方向と $\beta$ 方向のフォトリック結晶発光素子の光が光出力領域で結合することになり、発光モードが安定となる。

#### 【0046】

本実施例の発光素子の製造方法を図11に示す。具体的な製造方法は、図9と同様である。フォトリック結晶凹部を二次元形状に配置している。また、四辺をへきかいするのは、極めて困難であるために、共振器端面はドライエッチングで形成し、高反射膜を形成した。この素子の動作原理について図7（b）に示す。縦軸がエネルギー横軸が波数である。領域Aにおいては、共振器方向にモードが局在するため、縮退が解けて、高エネルギー端が2つのバンドにスプリットする。一方、領域Bにおいては、 $\alpha$ 方向と $\beta$ 方向が対称であるため、一つのエネルギー準位に縮退する。ここで、領域Aの光が領域Bに入射した場合、領域Aの低エネルギー側の光A1は、領域Bのバンドギャップ内に位置するために伝播できず、放射モードとなる。一方、高エネルギー側の光A2は領域Bを透過するために、増幅される。領域Bの回折効率 $\kappa$ や周期 $\Lambda$ を調節して領域B'に示したように領域Aの光A2と領域Bの高エネルギー端のエネルギーが一致するように

すると、領域Aの光A2のみが増幅され、外部に取り出されることになる。この場合の、電界の挙動は、図7(c)に示したように、 $\alpha$ 方向の電場の変動と $\beta$ 方向の電場の変動が直交することにより、光の周波数で偏波面が回転することになる。通常の観測では、電場が直交しており、磁場と電場が重なって観測されることになる。その結果、電場の方向は共振器方向すなわちフォトニック結晶の周期ポインティングベクトルの方向となる。通常のフォトニック結晶素子の場合には、電場が周期ポインティングベクトルからずれることが問題となっているが、本構造においては、ポインティングベクトルの方向に直交する電場が存在することが明らかとなった。この、フォトニック結晶発光デバイスの構成は、図5に示した種々の構造の組み合わせで構成することができる。図7(d)や図7(e)では、矩形凹部で領域Aを構成しており、領域Aにおける光A1の発光が抑制される。また、光出力領域も矩形凹部構造とした図8(a)、図8(b)構造においても、ポインティングベクトルの回転が抑制されることがわかった。特に、共振器構造を形成するストライプ外部に漏れ出す自然放出光を抑制するために、ストライプ外部に発光波長がフォトニックバンドギャップ内になるように周期を調整した円形凹部を形成することで、発光効率の増大を確認した。

## 【0047】

図8(c)には、発光波長がフォトニックバンドギャップ内に存在するフォトニック結晶を共振器周囲に形成したフォトニック結晶発光素子構造を示した。図12に、図8(c)に示したフォトニック結晶発光素子の製造方法を示した。この場合には、レーザ端面に高反射膜を形成しないで良いというメリットがある。具体的な製造方法は、図4(d)で説明したものと同様である。

## 【0048】

以上、フォトニック結晶格子は、正方あるいは長方格子としたが、図8(d)に示したように三角格子にしても良い。この場合には、レーザの共振器方向は、直行しないで $60^\circ$ の角度で交差することになる。図8(d)の構造の場合には対象となる方向が3つ存在するために、3重縮退している。したがって、フォトニックバンドギャップの構造も複雑となるため、設計が困難であるという問題がある。ただし、図に示したように、発光領域の大部分からの自然放出光を利用す



ることが可能であることから、高出力発光素子の作製においては有利であった。

【 0 0 4 9 】

【発明の効果】

以上のように本発明では、低閾値電流で偏波面が制御された面型発光素子、およびその製造方法を提供する。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

従来の面型発光素子の構造を示す図

【図 2】

本発明の実施の形態 1 における面型変調器の構造を示す図

【図 3】

本発明の実施の形態 2 における面型変調器の構造を示す図

【図 4】

本発明の実施の形態 3 における面型変調器の構造を示す図

【図 5】

本発明の実施の形態 4 における面型変調器の構造を示す図

【図 6】

本発明の実施の形態 5 における面型変調器の構造を示す図

【図 7】

本発明の実施の形態 6 における面型変調器の構造を示す図

【図 8】

本発明の実施の形態 6 における面型変調器の構造を示す図

【図 9】

本発明の実施の形態 1 から 5 における面型発光素子の製造方法を示す図

【図 1 0】

本発明の実施の形態 1 から 5 における面型発光素子の製造方法を示す図

【図 1 1】

本発明の実施の形態 6 における面型発光素子の製造方法を示す図

【図 1 2】

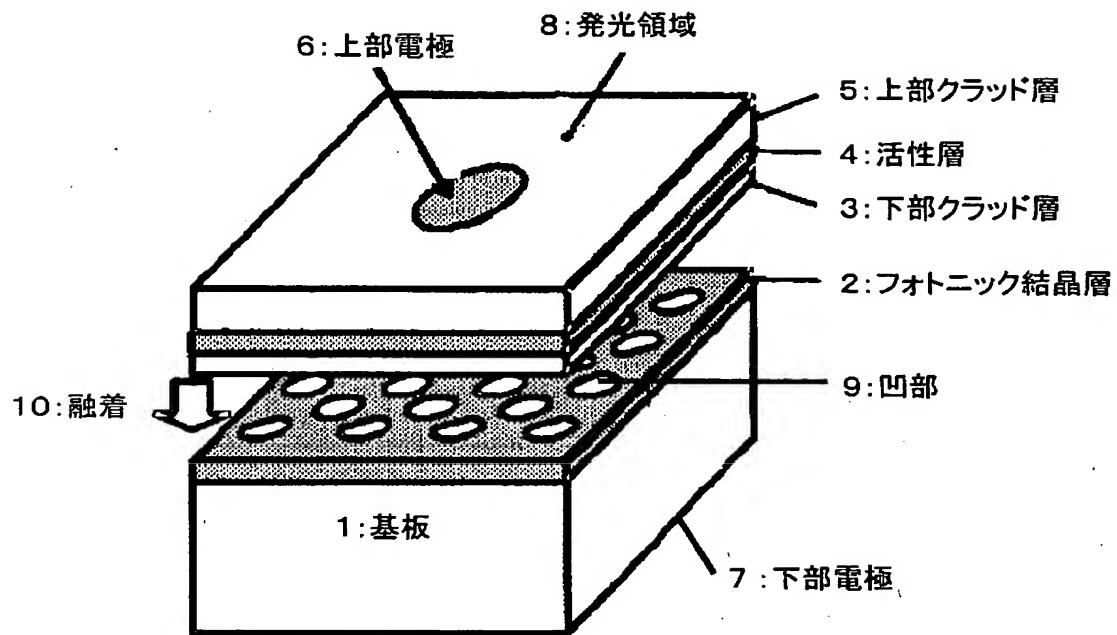
本発明の実施の形態 6 における面型発光素子の製造方法を示す図

【符号の説明】

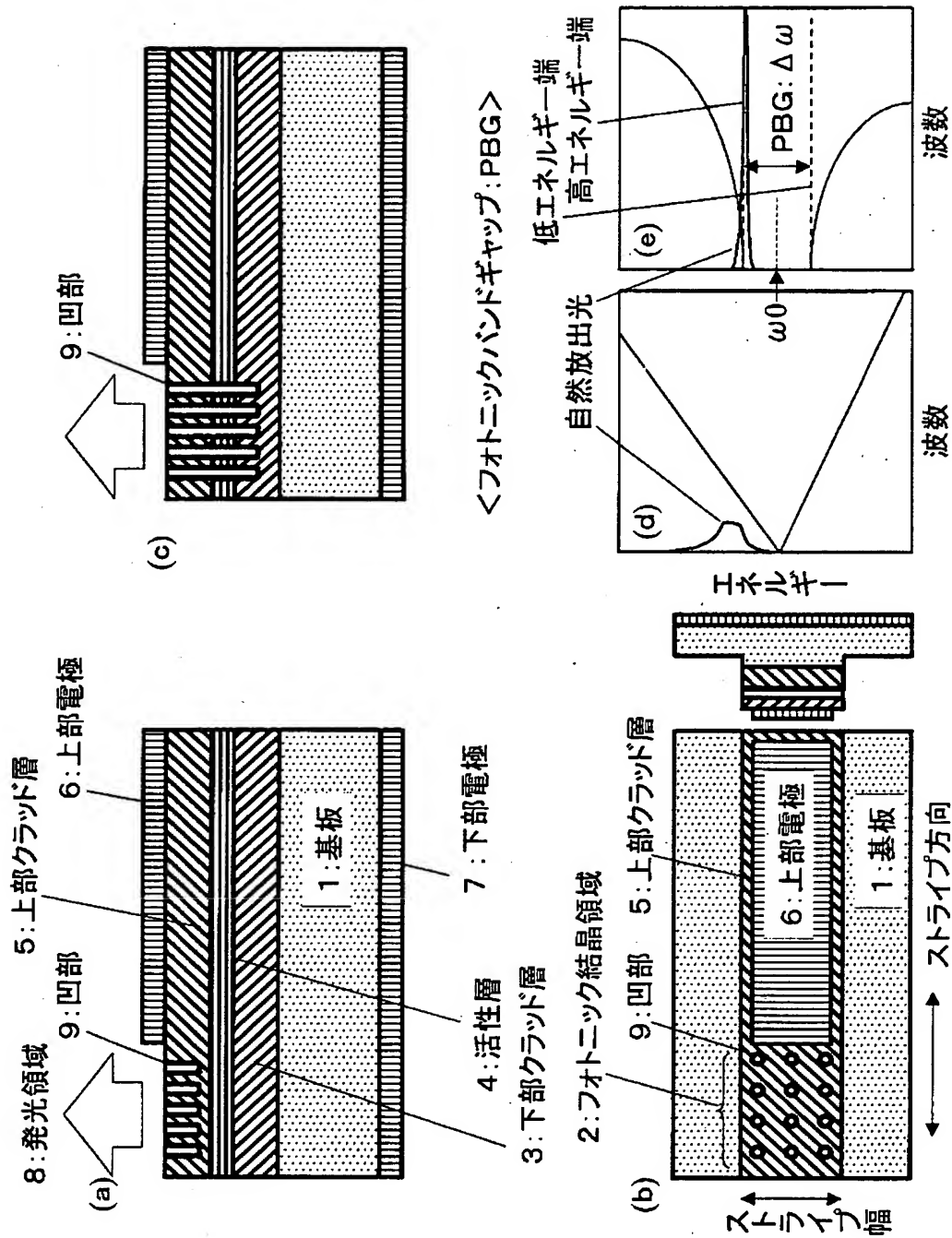
- 1 基板
- 2 フォトニック結晶層
- 3 下部クラッド層
- 4 活性層
- 5 上部クラッド層
- 6 上部電極
- 7 下部電極
- 8 発光領域
- 9 凹部
- 10 融着
- 12 反射用凹部
- 13 平板凹部
- 14 シフト領域
- 17 発光領域
- 18 分離溝

【書類名】 図面

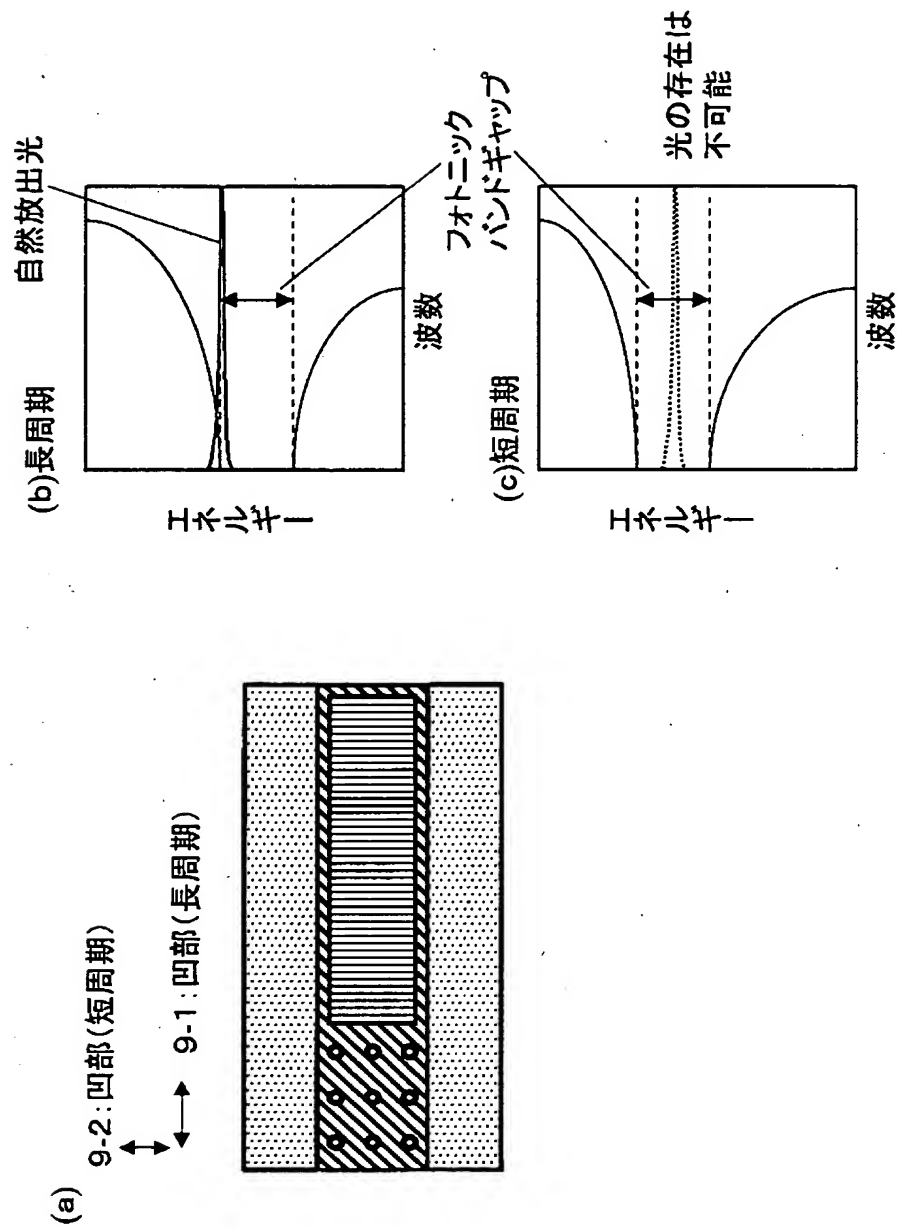
【図 1】



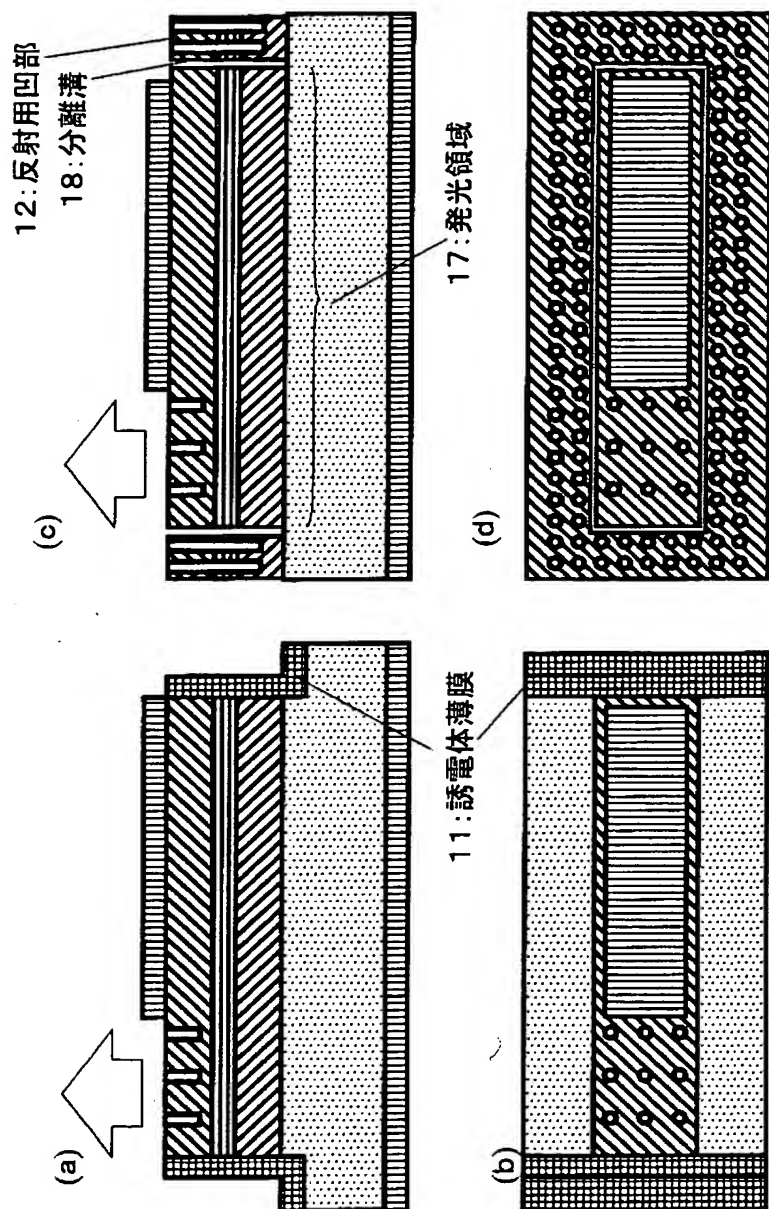
【図 2】



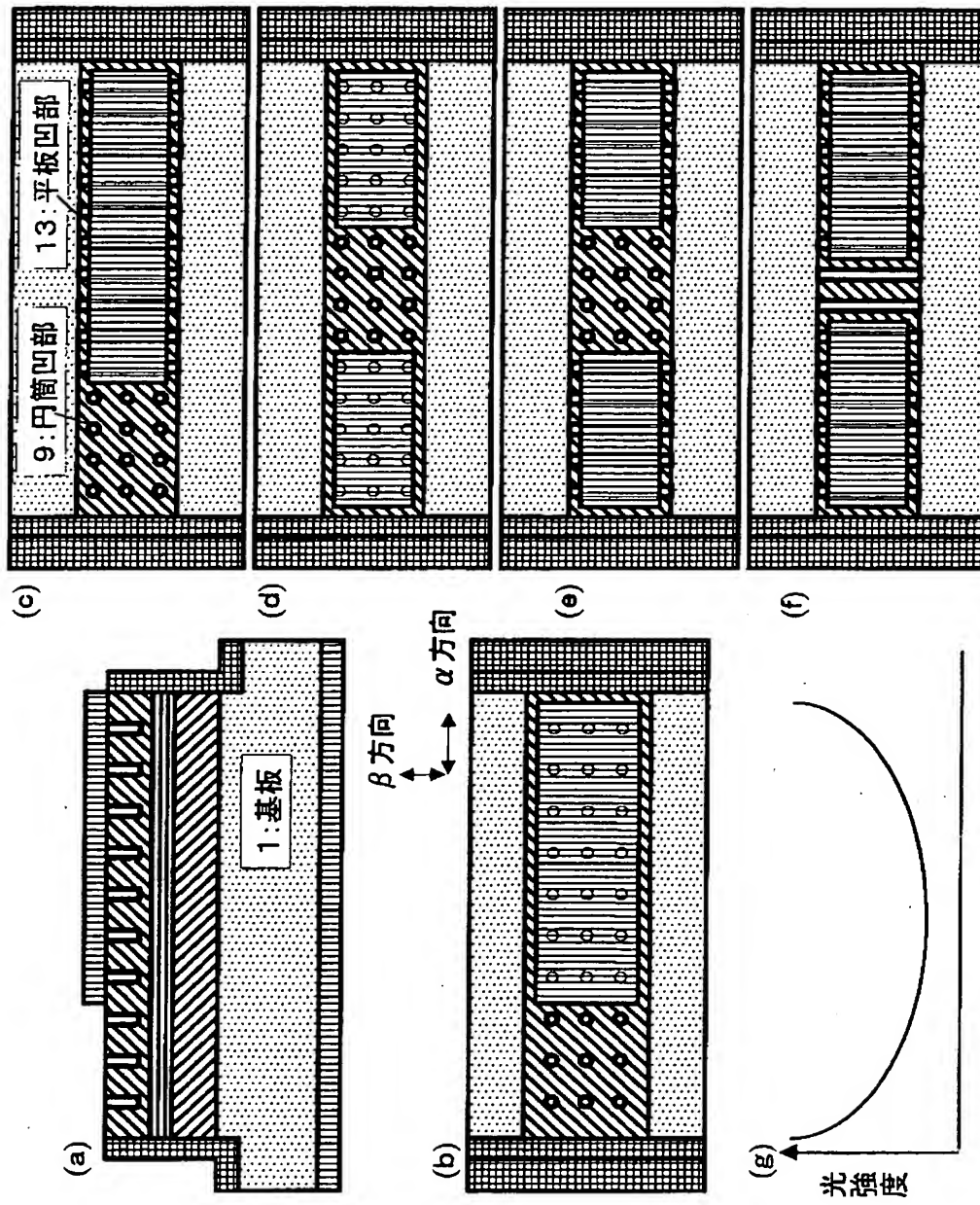
【図3】



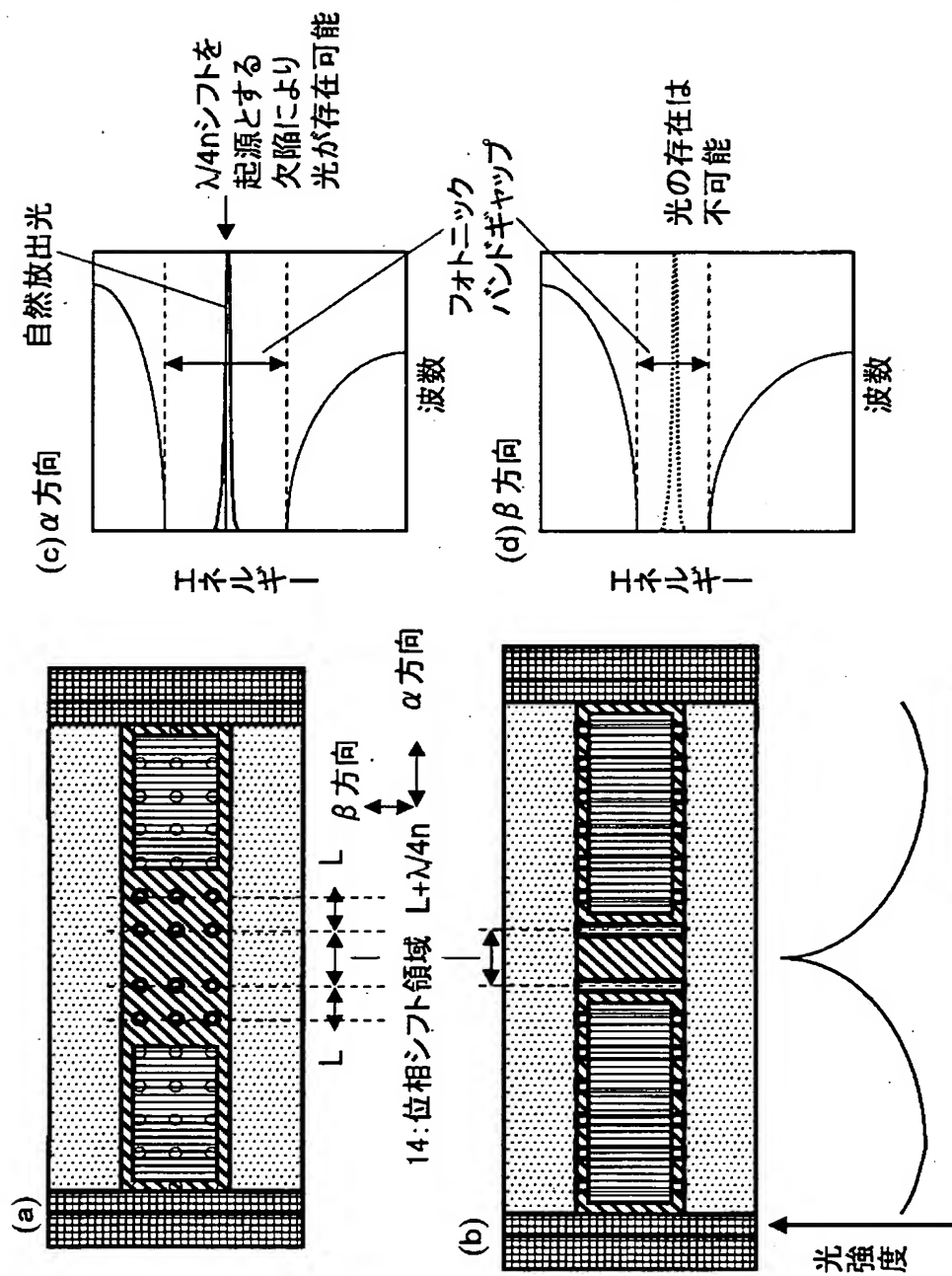
【図 4】



【図 5】

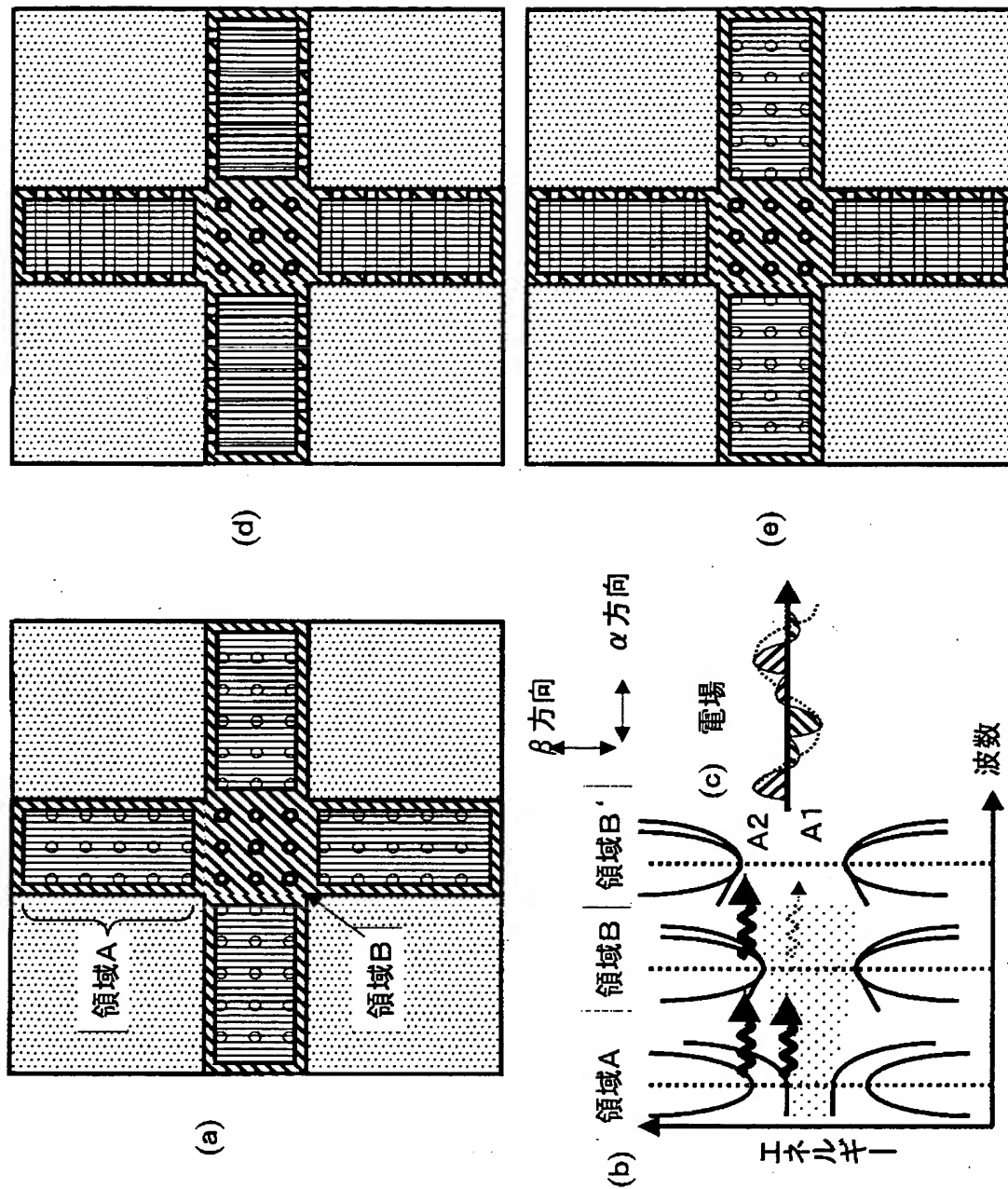


【図 6】





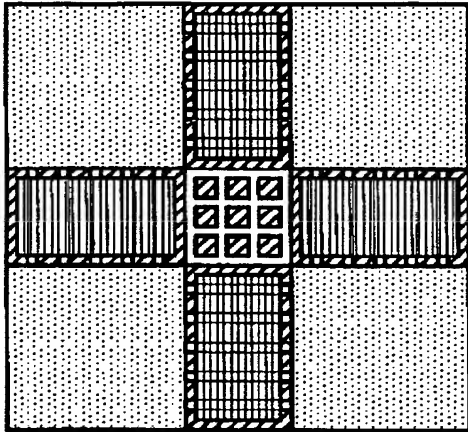
【図 7】



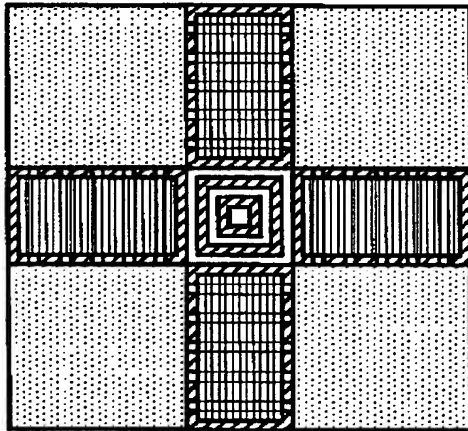
【図8】

図8

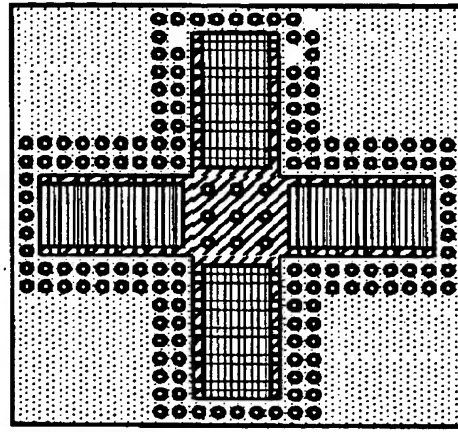
(a)



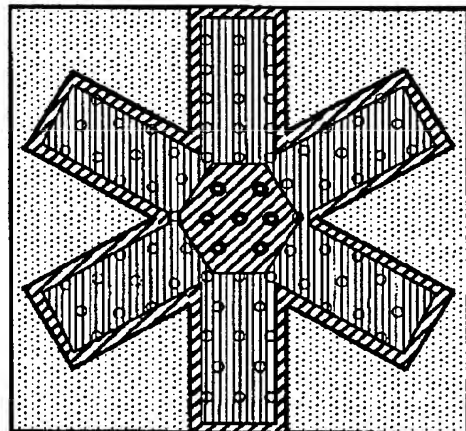
(b)



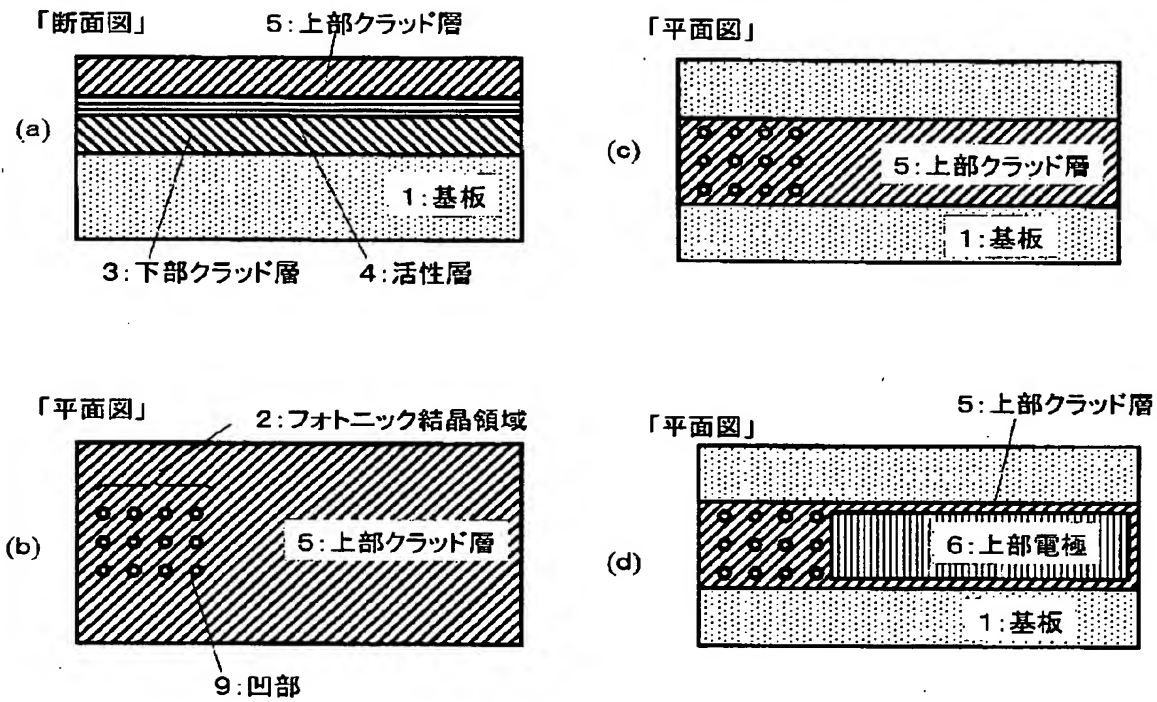
(c)



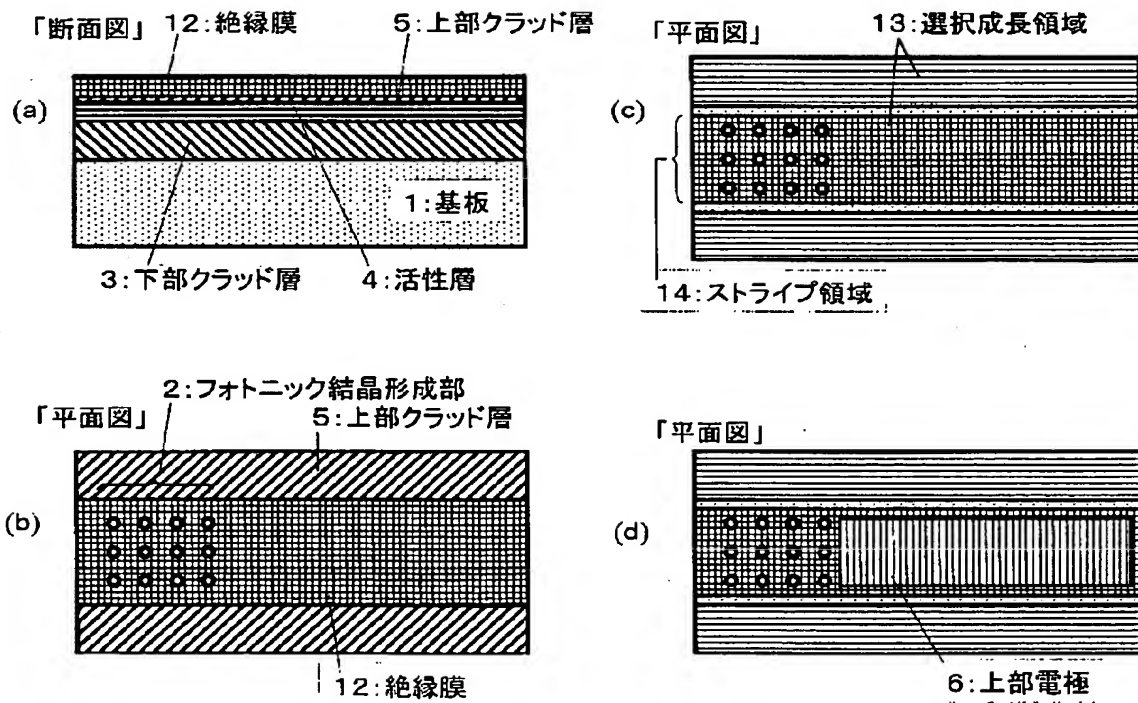
(d)



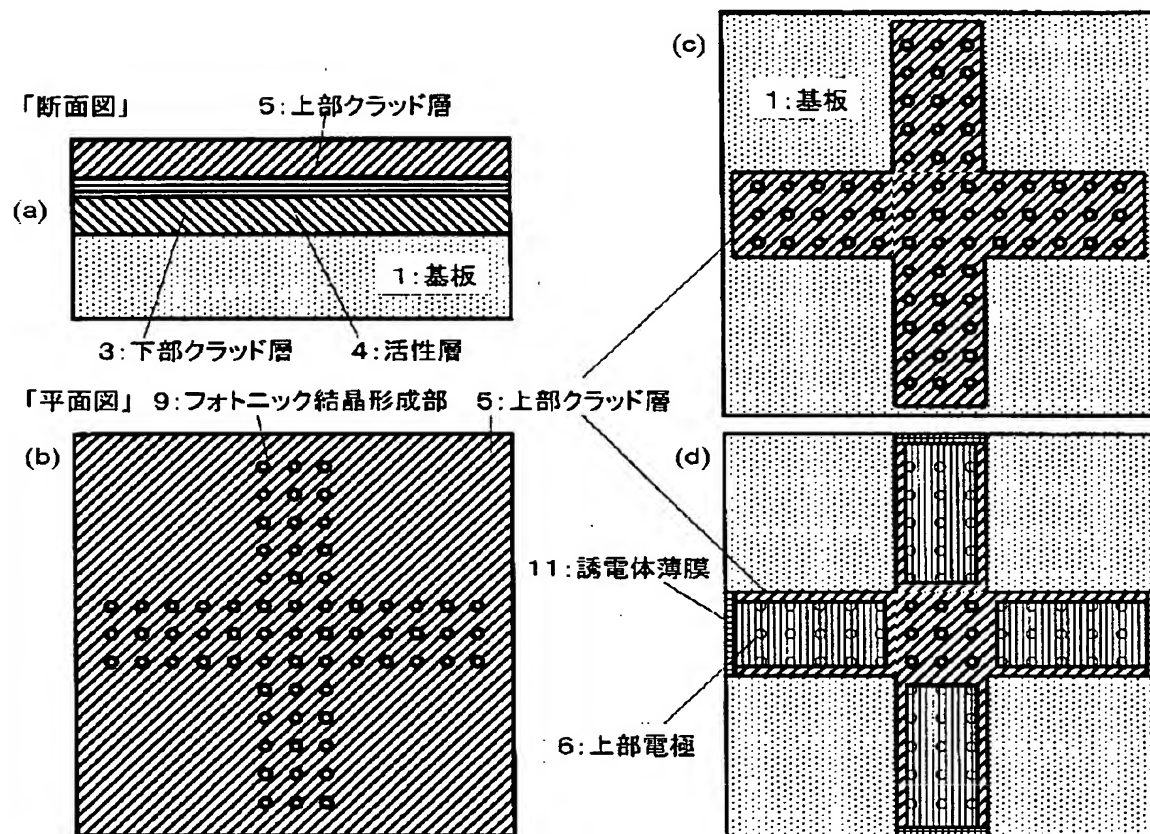
【図 9】



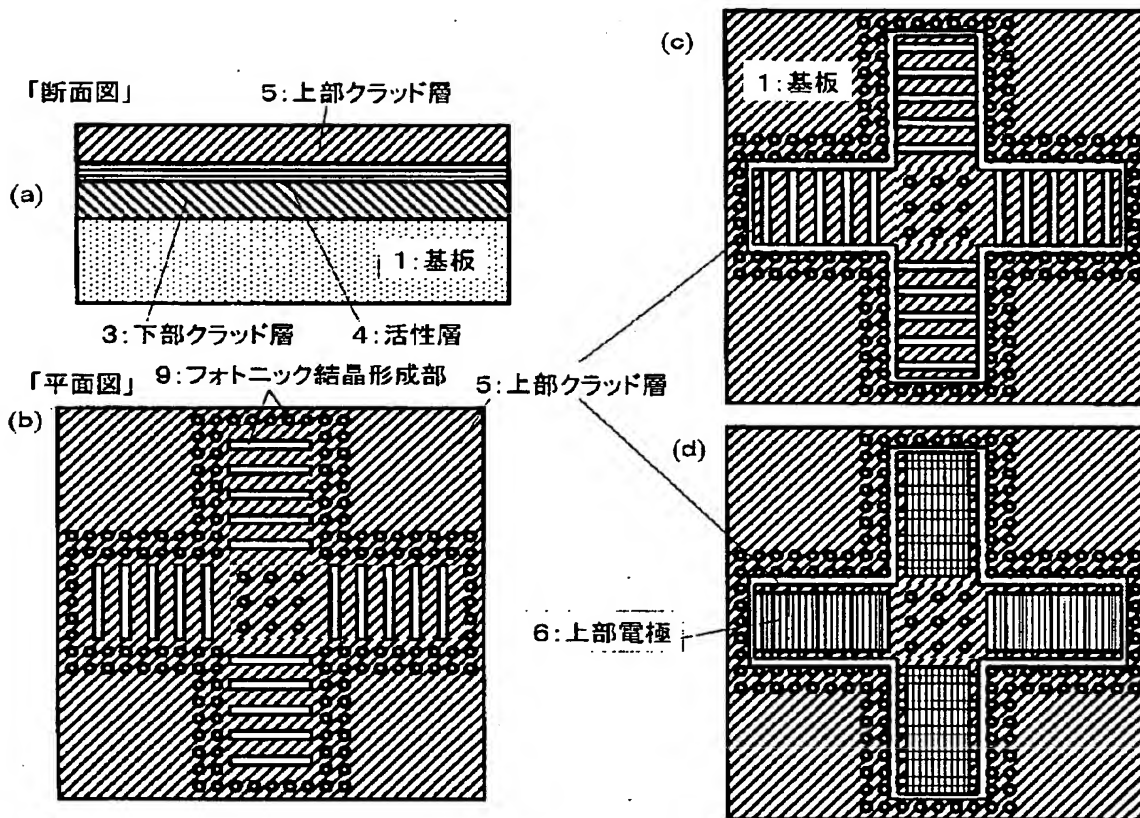
【図 10】



【図 11】



【図 12】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 低閾値電流面型フォトニック結晶発光素子を作製する。

【解決手段】 ストライプ共振器構造と短共振器構造を有し、共振器を直交させる。

【選択図】 図 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005821]

1. 変更年月日	1990年 8月28日
[変更理由]	新規登録
住 所	大阪府門真市大字門真1006番地
氏 名	松下電器産業株式会社